

階層的モデリングによる広域水循環予測

研究代表者 木本 昌秀
(東京大学気候システム研究センター)

1. 全体の構想

水循環予測に対する社会的な要請と期待は大きく、大気-海洋-陸面過程を総合して表現する気候の数値モデルを用いたアプローチはこれに応えるもっとも有望な手段の一つである。本研究は、数値モデルを用いて、時間的には季節～年々、空間的にはおよそ 1000km 以上のスケールでの広域水循環変動の予測可能性を明らかにすることを旨とする。とくに日本にかかわりの深いユーラシア～東アジア域を中心に考察する。モデル開発、水循環に関する種々の気象現象の解析はこれまでも精力的に行われてきたが、長期予測可能性についての検討は不十分である。本研究では、数値モデルによる広域水循環変動の再現性を高め、その予測可能性について明らかにすることを旨とする。現存のモデルによって多数の予測例を稼ぎ点数を評価することを目的とするものではなく、いつ、どのような現象が、なぜ、またどのように予測可能なのか、についての検討に重点を置く。

2. 研究手法と体制

本研究課題の特徴は、多様なモデルを開発・使用し、さまざまな角度から広域水循環の予測可能性の評価とそのメカニズム解析を行うことである。研究はおおまかに、

(1) モデル開発

(2) 予測可能性評価

に分けられる。

文字通り大気に国境はなく、日本のように限られた地域といえども、数週間以上の長期予測となると世界中の他の地域からの影響を受けるため、全球の大気、水循環を表現する大気大循環モデル

(Atmospheric General Circulation Model; AGCM) が広域水循環変動の予測のもっとも重要な道具である。しかし、現在広く用いられている AGCM の水平格子サイズは 300km 程度と粗く、梅雨前線や降雨をもたらす気象擾乱の表現が十分でない。また、格子点以下の現象を格子平均量で表現する「パラメタリゼーション」手法を用いざるを得ないため、広域水循環の再現性にも課題が多い。ここでは、モンスーンや梅雨前線に伴う降雨の年々、季節スケールでの再現性向上を目的としてモデ

ルの高分解能化、パラメタリゼーションの精度向上を図る。また、長期予測にはエルニーニョなどの大規模大気海洋相互作用の表現も不可欠である。大気海洋結合モデルの高精度化も行う。さらに、大循環モデルで扱えない局地気候を扱ったり、パラメタリゼーション改良に資するために雲解像モデルも用いる。

気候系は複雑な非線型システムであり、そこに生ずる変動のメカニズムの理解には、現実と同様の複雑さをもつ大循環モデル出力の解析のみでは不十分な場合が多い。このため、熱源に対する応答や大規模場のもとでの高低気圧集団(ストームトラック)の振る舞いなどの定量的解析を行うことができる線型モデルを構築し、メカニズム解析に資する。

大気大循環モデルを中心に上記のような多様なモデルを駆使して、東アジアを中心とした広域水循環の長期変動の主要モードの同定、メカニズムの解析を行い、それをもとに、特徴ある変動、年に焦点を当てた事後予測実験等を行い、予測可能性を評価する。

東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所大気物理研究室、地球環境フロンティア研究センターの合同チームを中心にモデルの開発、改良を行っている。長岡技術科学大、北大でもモデル開発と予測可能性研究を進めている。気象庁予報部からは雲解像モデルの提供を受けると同時にモデル開発について情報交換し、気象庁気候・海洋気象部とは予測可能性について研究協力を行っている。

3. 研究成果の概要

(i) モデル開発

大循環モデルの高解像度化

東大気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所(NIES)の合同チームは、十年來にわたってCCSR/NIES AGCMの開発を行ってきた。ここ数年来、長期積分を行う大気大循環モデルの標準的な解像度である水平格子約300km、鉛直20層のモデルをもとに、水平約120km、鉛直56層のモデルに拡張し、プログラムの並列・高速化、

新規パラメタリゼーションの導入や既存のものの再調整などの作業を精力的にすすめてきた。この結果、高解像度版を広域水循環予測等の研究に耐えるレベルにまで調整することができた。同時に、大気海洋結合モデルも高解像度化、高精度化を行った。大気モデル、結合モデルとも延べ数百年の積分を行い、これまで十分に表現されなかった梅雨前線やモンスーン域の季節内変動などが改善された。高分解能大気海洋結合モデルは、大気の水平解像度 120km (球面調和関数展開の三角形切断で T106)、鉛直層数 56、海洋は、水平 $1/4^{\circ} \times 1/6^{\circ}$ 、鉛直 48 層を持ち、長期積分を行う気候モデルとしては現在世界で最高解像度を誇るものである。

モデルの高精度化

大気大循環モデル及び大気海洋結合モデルの大幅な改良を行った。主な改良項目は以下のようである。

- ・ 多数ノードによる計算に耐えるプログラムの並列効率化、高速化。
- ・ 各種サブモデルとの結合を行うためのカップラープログラムの整備、モザイク結合の導入。
- ・ 大気における鉛直ハイブリッド座標オプションの導入。
- ・ 格子移流スキームの改良、標準オプション化
- ・ 海洋モデルの自由表面化、ハイブリッド鉛直座標導入。
- ・ 新規海洋混合層過程の導入と改良。結合モデルでの現実的なエルニーニョ再現等に有効である。
- ・ エアロゾル第一種、第二種間接効果の標準化。エアロゾル輸送モデルのオプション化。
- ・ 積雲対流のトリガリング過程 (成層不安定状態から実際に対流を生起させる過程) の導入。これにより、熱帯域の季節内変動の表現力が大きく向上することを見出した。
- ・ 積雲摩擦、雲頂でのエントレインメント不安定過程の導入。
- ・ 大気境界層湿潤クロージャの高度化。
- ・ 雲過程の改良。とくに水雲と氷雲の分配、水雲の落下過程の改善。このプロセスは、モデルの気候感度 (地球温暖化時の昇温の程度など) に決定的な役割を果たしていることがわかった。
- ・ 放射計算における雲のマキシマムランダムオーバーラップの導入。
- ・ 雲などに関わる各種診断量の導入。

高解像度化のインパクト

大気モデルの高解像度化は、細かい地形の効果や、数百~千 km スケールの降水をもたらす気象擾乱の表現が向上することのほかに、大規模基本場の表現向上を通して、解像度依存性が一見小さいと思われる数千 km スケールの長周期変動の表現の向上ももたらす。熱帯の季節内変動やブロッキング現象の表現にその例を見ることができた。詳細な解析によって科学的な知見として確立してゆく必要がある。

湿潤線型モデルの構築

線型モデルについては、本研究において湿潤過程を含むように従来のモデルを拡張することができた。これにより、海面水温に対する大気循環の応答を求める際に、海面水温のみならず大気循環の関数でもある非断熱熱源をアプリオリに与えざるを得ない矛盾から解放される。エルニーニョに対する大気応答 (~異常気象) の解釈に湿潤線型モデルが有効であることを示すことができた。

局地降積雪のシミュレーション

高解像大循環モデルといえども数 10km スケールの降水現象の再現はまだできない。北陸地方を対象とした領域モデルによるシミュレーション、また、圧密過程を含む多層積雪モデルを開発して、豪雪地域における局地降積雪の予測可能性を探る試みを進めている。1次元モデルとしての積雪モデルの振る舞いは良好である。領域モデル結果は陸面条件の設定に対する感度等を追求してゆく必要がある。

雲解像モデルと大気大循環モデルの結合

大気大循環モデルのパラメタリゼーションの代わりに2次元 (水平一方向-鉛直) の雲解像モデルを用いるスーパーパラメタリゼーション手法の有効性とパラメタリゼーション改良へのインパクトを評価するため、プロトタイプモデルの構築を開始した。大循環モデルとの結合等に関わるコーディング上の制約等から既製の雲モデルは用いず、書き下すことにした。雲モデルのコーディングと大循環モデルへの埋め込み作業は終わっているが、雲モデルを1-2日の短期でなく、長期積分するための調整や、大循環モデルとの変数の双方向のやりとりに伴う問題を解決する必要がある。このうち、双方向ネスティングに伴う問題は、鉛直グリッドの違いから来る計算モードの励起に関係することがわかっており、比較的簡単な操作で当面回避できることがわかった。また、現在は 64 ノードの PC クラスタ計算機で開発を

行っているが、低分解能大循環モデルでも全グリッドへの埋め込みには大量の計算時間を要する。パラメタリゼーション向上への重要な基礎研究と位置付け、堅実に進捗させる。

(ii) 予測可能性

広域水循環は大気の大循環と不可分である。大気大循環の変動とそれに伴う降水等水循環の長期予測にはまず、予測可能な成分とその形成維持メカニズムを同定し、数値モデル等を用いて予測可能性を探る必要がある。日本を含む東アジア域の天候変動は、熱帯の水循環の変動と、中高緯度ジェット気流の変動の両方によって支配されている。長期観測データにより夏季アジアモンスーン水蒸気フラックス年々変動の解析を行い、あらたに重要なモードを同定することができたので、その形成維持メカニズムと予測可能性の探求を行っている。一方、オホーツク海高気圧など北の気圧システムの長期変動にユーラシア大陸の陸面条件等が大きく影響している可能性が見出され、その実態とモデルによる予測可能性を追求している。

春季ユーラシア大陸の東アジア初夏天候への影響

まず、新しい仮説として、初夏の東アジアの天候変動に対する晩冬から春にかけてのユーラシア大陸上の循環変動の影響に着目している。春季のユーラシア大陸北部（シベリア）の地表気温は非常に大きな空間スケールを持ち、引き続き初夏のオホーツク海高気圧の活動度に影響を与えていることが明らかになってきた。春のシベリアの気温が高いとオホーツク海高気圧が優勢となる。シベリア気温の変動は晩冬の北大西洋振動（NAO）モードの動向に左右される。シベリアの気温偏差の形成過程、初夏へ続くメモリメカニズムの解析を進めている。この現象は、近年の天候トレンドや温暖化時の気候変化にも大きな意義を持つ。

また、2003年夏の冷夏に関連して、欧州からシベリア上空を経て東アジアに至る導波管の活動がオホーツク海高気圧の活発化をもたらしたとの仮説のもとに数値実験等による検証を進めている。

夏季アジアモンスーン水循環の主要変動モード

夏の東アジアモンスーンの変動は、西太平洋フィリピン東沖の対流活動と密接な関係にある。長期間の水蒸気フラックス変動の解析から、フィリピン沖とインドネシアとの間でシーソー様の対流活動の変動が主要な変動モードとして同定さ

れ、Pacific-Indo Dipole モードと呼んでいる。このモードの形成維持にモンスーンの季節平均場が重要な役割を果たしていることが、線型モデル等による解析によりわかった。このモードは本質的に特定の場所の海面水温変動のような外部強制がなくても存在する。しかし、年々異なったパターンで変動する海面水温は毎回異なった形でこのモードの正負を励起する。したがって、このモードの予測に、特定場所の海面水温インデックスは無効である。大気大循環モデルは複雑に変動する海面水温に対するこのモードの応答をよく再現することがわかった。2004年の猛暑もこのモードが重要な役割を演じており、事後予測実験を実行中である。

このほか、東アジアの冬季天候～北極振動（AO）の励起に秋の東シベリアの積雪偏差が鍵となっていることが事例予測実験によって確認された。また、エルニーニョと夏季東アジアの冷夏傾向のメカニズムについて湿潤線型モデル等による解析を進め、インド洋海面水温の影響、熱帯環状モードの役割が明らかになってきた。さらに、近年の冬季東アジアジェット上の高低気圧活動のトレンドが温暖化と関連している可能性を示す数値実験結果を得た。

4. 研究成果の詳細

高解像度化のインパクト（木本昌秀）

大気大循環モデルの高解像度化によって、細かい地形性の降雨パターンは確実によくなる。梅雨前線の特徴である水蒸気の大きな南北傾度や、降雨をもたらす前線上の気象擾乱の表現も解像度とともに向上する。また、降雨をもたらす気象擾乱の表現が向上するため、降雨強度の頻度分布もよくなると期待される。図1は、夏季（6-8月）日本付近の水平250km格子での日別降水量の強度別頻度分布を中解像度モデルと高解像度版、そして衛星データによる見積もりを比較したものである。中解像度モデル

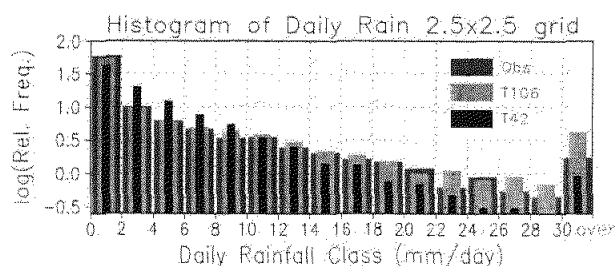


図1 日本付近の夏（6-8月）における日降水量の強度別頻度分布。

では、弱い降雨の頻度を過大評価し、逆に強い降雨頻度を過小評価する傾向があるが、高解像度モデルでは改善されている。ただし、このような精度向上は、高解像度化のみによるのではなく、格子点以下の雲や境界層過程の調整、例えば不安定成層に伴う積雲対流の生起条件の設定等に強く依存することがわかった。

大気大循環モデルによる広域水循環変動の再現性を確認するため、1979年から2002年までの観測された海面水温を与えて高解像度、中解像度大気モデルを積分した。大気のカオス性から来るサンプリングエラーを減らすため、初期値を変えて各解像度3本ずつのアンサンブル実験を行った。図2は、6-8月平均の鉛直積算水蒸気フラックス平年偏差の観測値とモデル計算値の空間パターン相関を示す。パターン相関はモデルのアンサンブル平均偏差と観測の平年偏差の間で、アジアモンスーン域（東経40°-150°，南緯20°-北緯40°）にわたって積分して求めた。熱帯での水循環偏差は海水温分布に規定される部分が多いので、適当な初期値から始めた長期積分でも現実をある程度模倣できると期待される。

図を見ると、高解像モデルの方がおおむねスコアがよい、すなわちシミュレートされた水蒸気循環の偏差が観測と似ていることがわかる（2002年夏の高解像モデルのスコアが悪いことについては調査が必要と考えている）。しかしながら、長江洪水など顕著な大雨が東アジアを襲った1998年の0.8近い高相関を除くと0.6に達することはまれで、モデルの水循環偏差パターンの逐一をそのまま観測と比べて解釈することにはまだ無理がある。

高分解能化のインパクトを示す例として、夏季インド洋における40-50日周期での大規模雲塊の北進モードの表現を紹介する。図3は観測、T106、T42モデルによる外向き長波放射（OLR；数値が低いほど背の高い雲の存在を示す）の北進の様子

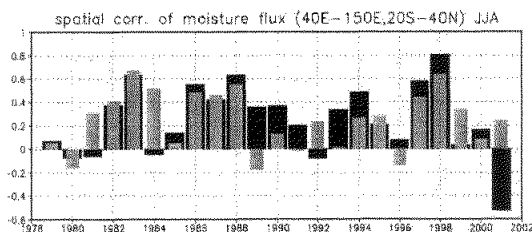


図2 アジアモンスーン域（東経40°-150°，南緯20°-北緯40°）における6-8月平均の鉛直積算水蒸気フラックス平年偏差の観測値とモデル再現値の空間パターン相関。横軸は年（1979-2002）。濃いパーはT106、薄いものはT42モデル。モデルは両解像度版とも観測された海面水温を与えた長期積分3本のアンサンブル平均。

を示す。OLRの20-120日周期成分を用い、赤道域5°S-5°N, 70°E-90°Eで平均したOLR時系列をキーインデックスとしてそれと他の場所の20-120日周期成分OLRとの時差回帰係数を計算したものである。85°Eにおける緯度一時差断面を示している。観測およびT106モデルでは赤道域OLRが北進する傾向が現れているが、T42モデルでは赤道域とその北の亜熱帯域で定在波的になってしまっている。T106とT42モデルの違いの理由は、高分解能化によって気候学平均的な下層風場の表現がよくなったことに求められる。図4は、観測、T106、T42モデルによる夏季（6-8月）平均の850hPa風ベクトルとロスビー波の復元力として働く実効 β と呼ばれる量（ $\beta^* = \frac{df}{dy} - \frac{d^2\bar{u}}{dy^2}$ ；

f はCoriolisパラメータ、 \bar{u} は気候学平均の帯状風成分）を陰影で示したものである。インド半島を南へ迂回する成分が観測、T106モデルでは表現されており、このため、実効 β の大きい領域がより低緯度まで広がっている。このような基本場の違いは赤道で大規模な雲塊が存在したときその北側に生じる低気圧性循環の応答の強さの違いをもたらす。図5は、観測、T106、T42モデルの気候値を基本場にして、インド洋赤道域の雲による加熱を与えたときの循環応答を線型大気モデルによって計算したものである。観測、T106基本場では加熱域北方に低気圧性循環が生じているが、T42基本場では応答が著しく弱い。低気圧性循環域では境界層収束等により水蒸気が蓄積され鉛直安定度が悪くなる。そのため、元赤道にあった雲塊が北方へ移動するものと考えられる。

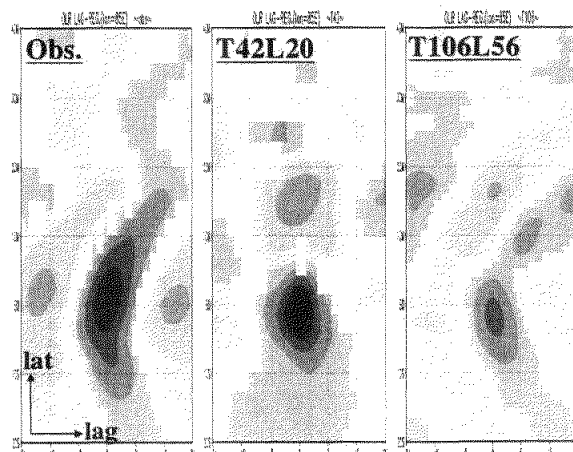


図3 20-120日周期成分OLRの時差-緯度断面図。赤道域5°S-5°N, 70°E-90°Eで平均したOLR時系列をキーインデックスとしてそれと他の場所のOLRの回帰係数を計算した。（左）観測値、（中）T42モデル、（右）T106モデル。

他の解析結果も総合すると、T42 から T106 への高解像度化により、大循環、広域水循環の変動再現性は確実に向上する。しかし、その程度

は広域変動の予測の困難さを一掃するものではない。変動のモードを抽出し、メカニズムに踏み込んで解析することが必要である。

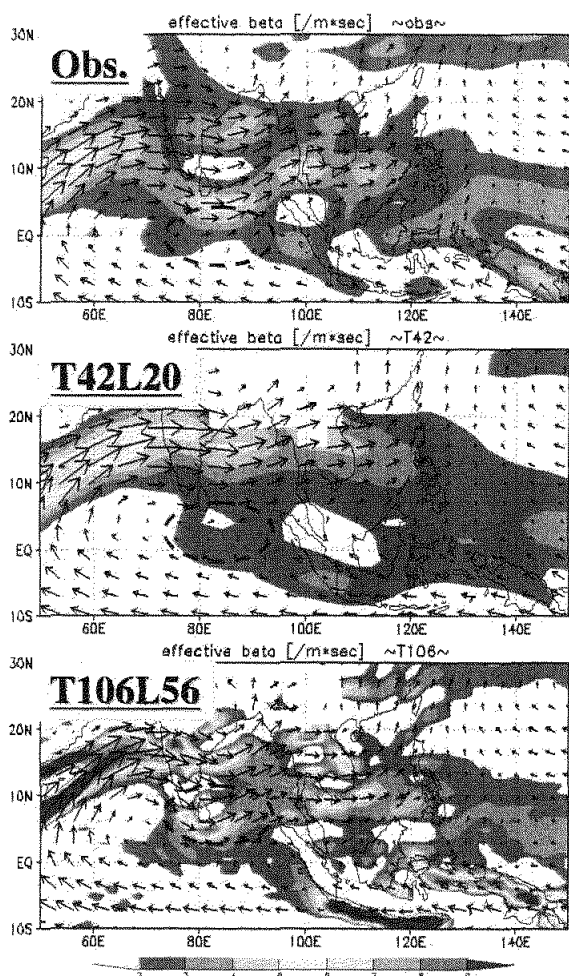


図4 夏季インド洋における気候学的な 850hPa 風ベクトルと実効 β (陰影) の分布。(上) 観測、(中) T42 モデル、(下) T106 モデル。

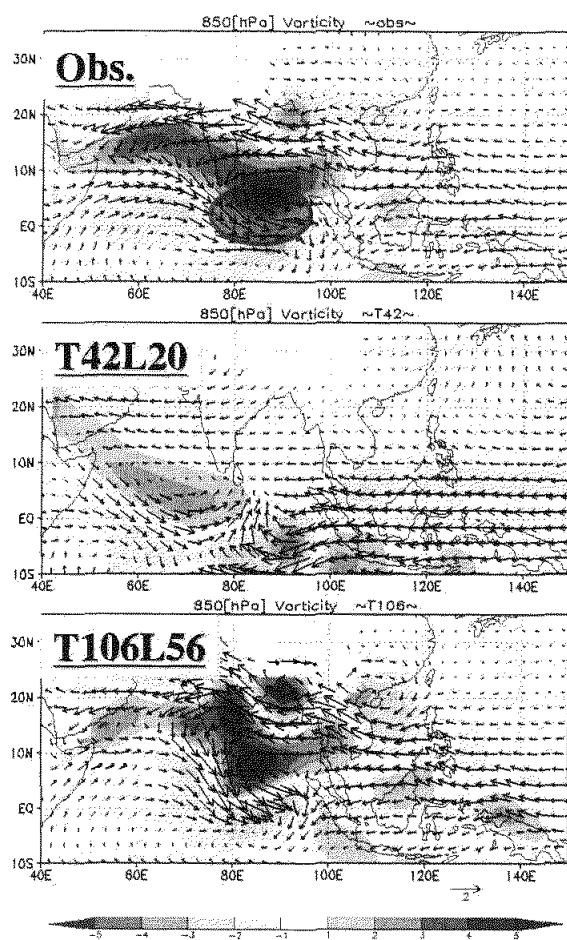


図5 (上) 観測、(中) T42 モデル、(下) T106 モデルの気候値を基本場として上図楕円域に加熱を与えたときの線型応答。ベクトル、陰影は 850hPa 風と渦度を表す。

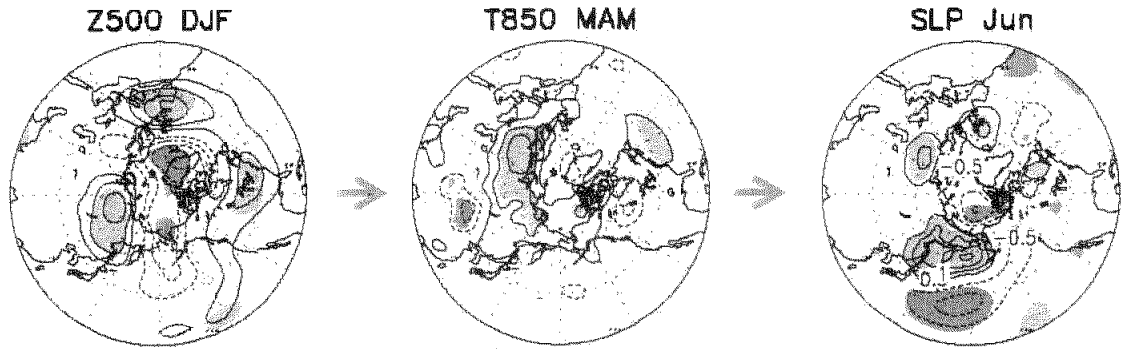


図6 6月オホーツク海域で平均した海面気圧偏差と各種変数の回帰係数図。(右)6月の海面気圧偏差、(中)先立つ3-5月平均の850hPa気温偏差、(左)同じく12-1月平均の500hPa高度偏差。

春季シベリアから初夏東アジアへの天候影響
(木本昌秀・荒井美紀・沈学順・宮坂隆之)

晩冬の北大西洋振動 (NAO) の偏差によって北シベリアの陸面温度、積雪の偏差が誘起され、さらに陸面温度の偏差は東シベリアにシフトし、初夏の東アジアにおける気候偏差、すなわちオホーツク高気圧の頻度や持続性と梅雨域の降雨の多寡に影響を与えていることがデータ解析からわかった (図6)。シベリアの気温偏差の形成にはNAOに伴う西風偏差が北大西洋の気候学的暖気を移流すること、春から初夏にかけての気温偏差の東進は、北進してくる気候学的西風による移流が効くことがわかった。

地表の高温偏差はブロッキングの頻発化をもたらす (図7) が、それはユーラシアでのダブルジェット傾向を強めるためと推察される。より詳しい解析が必要である。ユーラシア大陸が冷夏、長梅雨など極東の初夏の天候に与える影響は、これまで明らかにされてこなかった。観測データの解析、モデル実験を通して今後十分な検討を要する。その折りも折り、2003年は10年ぶりの冷夏となった。この例ではシベリアの陸面温度はあまり関与していなかったように見えるが、北大西洋からの波動伝搬 (テレコネクション) が盛んであ

ったことがわかった。モデルによる hindcast 実験を行った結果、北大西洋で5月頃から持続していた海面水温の負偏差パッチによって極東への波動伝搬が活発化することが示され、低温パッチ上空の低気圧偏差の下流側で起こった記録的な欧州熱波と日本の冷夏が関連していたことが示唆された (図8)。

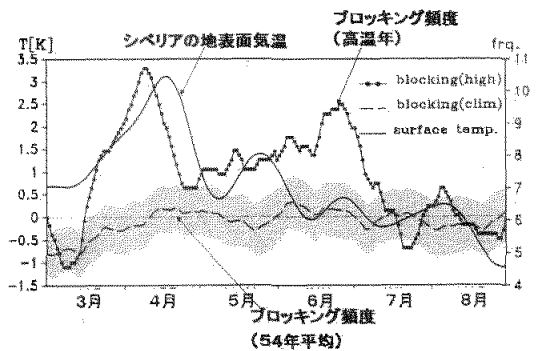


図7 4月シベリア北部の地表気温偏差が大きかった年の極東におけるブロッキング頻度の指数。破線と陰影域は、ブロッキング指数の過去54年間の平均値と1標準偏差範囲。4月のシベリア高温の影響が7月初めまでより下流のブロッキング頻度に影響を与えている。また図は省略するが、ブロッキングの強さ、持続性も平年に比べて増大することがわかった。

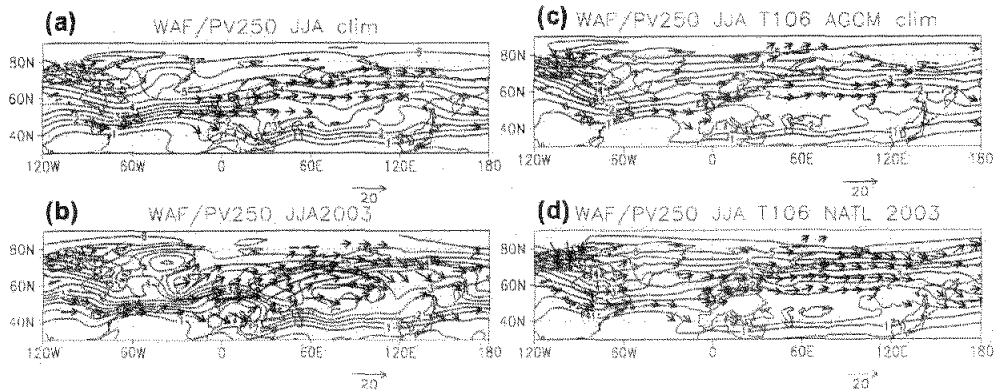


図8 夏季6-8月の月平均偏差波の活動度フラックス (矢印) とポテンシャル渦度 (等値線)。(a)観測された気候学的平均値、(b)2003年夏、(c)2003年5月を初期値とするT106大気モデルによる10メンバーアンサンブル積分の結果 (海面水温は気候値)、(d)(c)と同じ、ただし、北大西洋の負の海面水温偏差を与えたもの。気候値に比べて2003年はシベリア上空の波伝搬が活発だったことがわかり、それがモデルでもシミュレートされている。

アジアモンスーン水循環の主要変動モード力学と予測可能性 (安富奈津子・木本昌秀)

夏季アジアモンスーン域の水蒸気流束の年々変動偏差を長期間のデータから解析し、図9aに示すパターンを同定した。データ期間、用いる変数等を変えてもこの第1モードに変化はないため、統計的にロバストなモードである。西太平洋フィリピン沖とインドネシア上空の間の降水偏差のシーソー的変動で特徴付けられるので、Pacific-Indo Dipole と名づけた。長江洪水の1998年夏、そして記録的な猛暑となった2004年夏はこのパターンが卓越した典型的な年である。

このパターンの成因について、データ解析、大気モデルおよび線型モデルによる数値実験により考察を行った。気候学的平均の海面水温を与えた大気モデルでも生起することなどから、このパターンは基本的には海面水温変動等「外的条件」の強制なしに生じうる大気の「内部変動」モードであることが明らかとなった。しかし同時に、色々な場所の熱帯海面水温偏差の組み合わせがこのパターンを励起できることもわかる。大気モデルを用いた数値実験によれば、このパターンの過去20年の夏の年々変動の分散の58%は観測された海面水温を与えた大気モデルアンサンブルにより再現できる(図9b)。

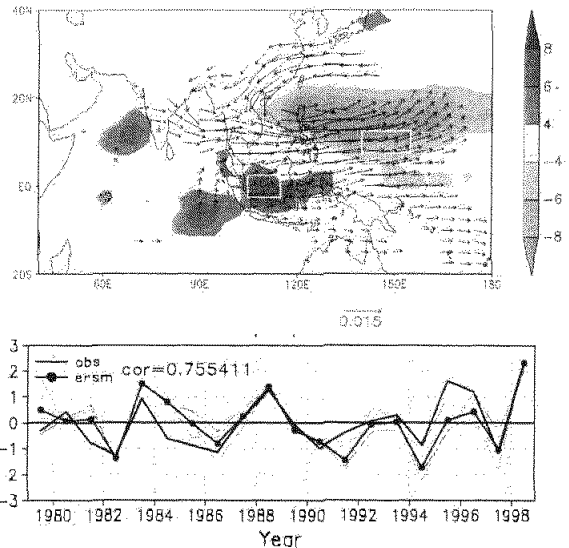


図9 (a) 夏季アジアモンスーン水蒸気フラックス変動の主要モード (Pacific-Indo Dipole)。水蒸気フラックス偏差 (矢印) および降水量偏差 (陰影)。(b) Pacific-Indo Dipole の観測された年々変動 (太い実線) と観測海面水温を境界値とする高解像度モデルアンサンブル (黒丸付き実線。メンバー数: 3) によるシミュレーション。両時系列間の相関係数は 0.76。

秋の積雪が東アジアの厳冬を誘起 (車恩貞・木本昌秀)

北半球冬季の中高緯度に卓越する変動として北極振動 (AO) がよく知られている。本研究では、このモードの励起に関して、冬に先立つ秋のユーラシア大陸東シベリア域の積雪・気温偏差が果たす役割がこれまでの研究で指摘されている。ここでは、典型的な逆符号の例である 1988/89 年と 2000/01 年の事例について事後予測実験を行った。

降雪があった後の10月の10日間の各日を初期値として翌年の2月まで、海面水温は気候値を与えて大気モデルを積分したところ、観測された符号のAOを励起することができた。初期値を10月の降雪が起こる前へずらすと応答が消えることから、シベリアの下層気温偏差がAO型偏差の励起に有効であることが確認された。

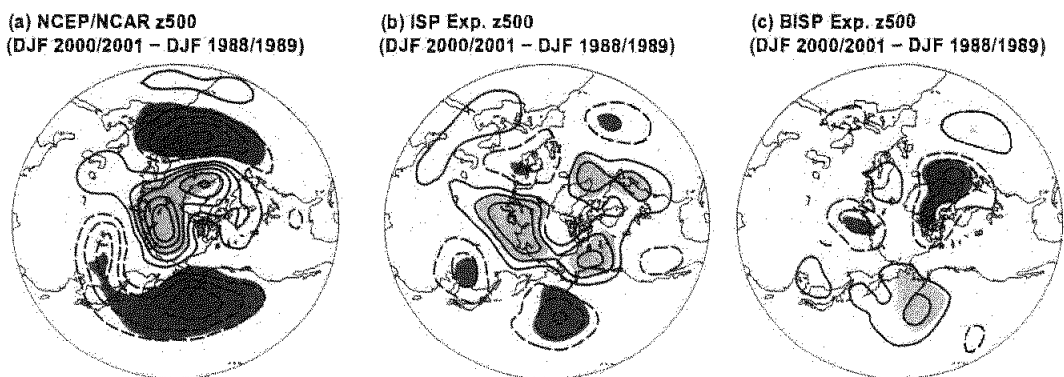


図10 12-2月3か月平均の500hPa高度の2000/01年と1988/89年の差。(a) 観測値。等値線は40m毎。(b) 10月を初期値とするモデルアンサンブル予報値の差。等値線間隔は10m。(c) (b)と同じ。ただし、初期値の日付が(b)より早く、2000年のケースでは降雪の前、1988年のケースでは暖気流入の前。いずれのパネルも95%有意な領域に陰影。

エルニーニョ年東アジアの冷夏について (車恩貞・木本昌秀)

統計的に、エルニーニョ年の夏は東アジアでは冷夏になる傾向が強いことが知られているが、そのメカニズムは不明である。過去50年間10ケースのエルニーニョ(および同数のラニーニャ)事例を解析し、東アジアの低温は、ユーラシア大陸中緯度に広く東西帯状に広がる低温偏差の一部であり、下層から上空まで同符号の順圧的なものであることが明らかになった。このテレコネクションの成因を探るため、エルニーニョに伴う海面水温偏差を湿潤線型モデルに与える数値実験を行った。図11に示すように、熱帯太平洋の海水温偏差だけでは東アジアの低温偏差の大きさの再現は十分でないが、インド洋の海水温正偏差を加えると改善される。エルニーニョ時の東アジアの天候予測に際し、インド洋の海水温の監視の重要性が示唆された。

インド洋の効果は同経度範囲でのハドレー型循環の励起とヒマラヤ等との相互作用によると思われる、現在解析中である。また、偏差形成には熱帯環状モード(TAM)が一定の役割を果たしていると考えられ、これを明らかにする必要がある。

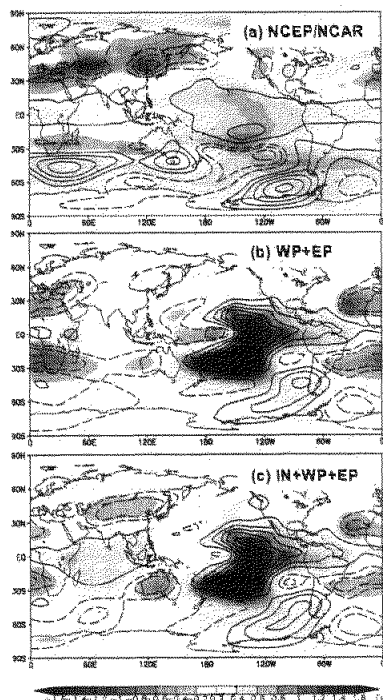


図11 エルニーニョ時の夏(6-8月)の200hPa高度(等値線)および気温(陰影)偏差の合成図(10ケースの平均)。(a)観測。(b)熱帯太平洋の海面水温を与えた線型湿潤モデルの結果。(c)(b)と同様。ただし、熱帯インド洋の海面水温偏差を加えたもの。

東アジアのストームトラックの近年のトレンドと温暖化の関係について (稲津将・木本昌秀)

ジェット気流上を伝搬する数日周期の高低気圧集団の活発な領域はストームトラックと呼ばれている。また、ストームは傾圧的に発達すると考えられるのでストームの活動度は上空のジェットの速さに比例すると考えられ、多くの場所では成り立っている。しかし、極東付近はこれに反して、真冬、ジェットがもっとも強くなる時期にストームは不活発になるという逆説的な変化をすることが知られており、mid-winter suppression(ここではMWSと略す)と呼ばれている。

近年、MWSが起こりにくくなっている、すなわち、真冬のストームが活発になってきているという長期傾向が観測データから指摘されており、地球温暖化との関連が推論されている。

このことを検証するため、現在気候(1xCO2)および温暖化条件(2xCO2)での高解像度大気大循環モデル実験を行った。図12に示すとおり、モデルは現在気候でのMWSをよく表現し、温暖化条件では真冬に活発化することが示された(ここでストームトラックは300hPa面での2-8日周期擾乱の運動エネルギーで定義した)。ジェットも相対的に弱くなっている。これは、温暖化によって海陸の温度差が小さくなり、惑星規模の波動の振幅が小さくなり、極東のジェットが弱まることに対応していると考えられる。

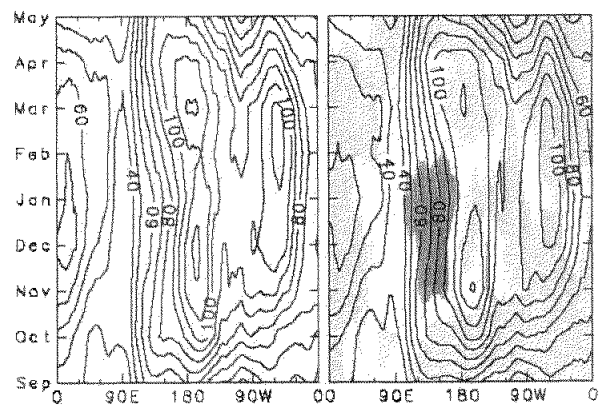


図12 北緯35-45°平均のストームトラックの各経度における9月-5月の季節変化。左は1xCO2実験および右は2xCO2実験と両実験の差(陰影;濃い陰影が正、薄い陰影は負)。

5. 考察と今後の展開について

大気大循環モデル、大気海洋結合モデルについては、高解像度化、高精度化の作業がようやく一段落した。今後しばらく固定したバージョンで数値実験を重ねてゆくことができる。

まず、解像度のインパクトについて、そのメカニズムも含めて科学的知見としてまとめてゆく必要がある。具体的には、基本場の傾度など量的な改善を通して一見解像度の影響を受けないと考えられる大規模現象にも改善が現れることや、高解像度の気象海洋結合現象などこれまで表現されなかった現象の解析などである。

また、モデル調整の過程で多数の課題も明らかになった。例えば大気モデルや結合モデルにおいてITCZ(熱帯収束帯)やSPCZ(南太平洋収束帯)といった降雨帯の表現が高解像度化によってもあまり改善しない。境界層や積雲対流に関する物理過程パラメタリゼーションの問題と思われる。広域変動、長期予測といってもやはりサブグリッドスケールの現象のより忠実な表現によってしか画期的な向上は望めないと思われる。この意味で、物理過程の精度向上の努力は続けなければならない。とくに、すぐには結果が出ないかもしれないが、雲解像モデルを用いたスーパーパラメタリゼーションは続けてゆきたい。

予測可能性については、東アジアの天候変動に関わる北と南それぞれからの影響がある程度フォーカスされてきている。とくに春季シベリアの東アジア初夏気候への影響は、多方面から組織的にアプローチするに足る大きな課題であると認識している。これまでわかってきていることを着実にまとめ、さらに数値実験によるアプローチを充実させる。

水循環について、季節内やより短い周期で降水をもたらす変動について高解像度モデルのメリットを十分に生かしたアプローチがまだできていない。今後の重要な課題としたい。

6. 主な研究成果

【査読付き論文(印刷・受理済)】

- Watanabe, M. and F.-F. Jin, 2004: Dynamical prototype of the Arctic Oscillation as revealed by a neutral singular vector. *Journal of Climate*, 17, 2119-2138.
- Weng, H., A. Sumi, Y. N. Takayabu, M. Kimoto, and C. Li, 2004: Interannual-interdecadal variation in large-scale atmospheric circulation and extremely wet and dry summers in China/Japan during 1951-2000. Part I: Spatial patterns. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, no.2, 775-788.
- Weng, H., A. Sumi, Y. N. Takayabu, M. Kimoto, and C. Li, 2004: Interannual-interdecadal variation in large-scale atmospheric circulation and extremely wet and dry summers in China/Japan during 1951-2000. Part II: Dominant timescales. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, no.2, 789-804.

- 熊倉俊郎, 早川典生, 2004: 降雪数値実験による北陸地方の降雪予測に関する研究. *水工学論文集*, 48, 277-282.
- Kikuchi, K. and Y. N. Takayabu, 2004: The development of organized convection associated with MJO during TOGA COARE IOP: Trimodal characteristics. *Geophysical Research Letters*, in press.
- 熊倉俊郎, 山野井克己, 早川典生, 2004: 積雪の多層圧密モデルを用いた北陸地方の降積雪現象の解析. *日本雪氷学会学会誌「雪氷」*第66巻, 第1号, P.35-50.
- Kikuchi, K. and Y. N. Takayabu, 2003: Equatorial circumnavigation of moisture signal associated with the Madden-Julian Oscillation (MJO) during boreal winter. *J. Meteor. Soc. Japan* vol.81, 851-869.
- Ishii, M., M. Kimoto, M. Kachi, 2003: Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimate. *Monthly Weather Review*, 131, 51-73.
- 木本昌秀, 2004: 欧州熱波と日本の冷夏 2003. *日本気象学会誌天気*, 印刷中.
- Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and D. E. Johnson, 2004: Spectral Retrieval of Latent Heating Profiles from TRMM PR Data. Part I: Development of a Model-Based Algorithm. *J. Applied Meteor.*, in press.
- Watanabe, M., and F.-F. Jin, 2003: A moist linear baroclinic model: Coupled dynamical-convective response to El Niño. *J. Climate*, 16, 1121-1139.

【査読付き論文(審査中)】

- Lombard, A., A. Cazenave, P.-Y. Le Traon, and M. Ishii, 2004: Contribution of thermal expansion to present-day sea level change revisited. *Global and Planetary Change*, submitted.
- Arai, M., and M. Kimoto, 2004: Relationship between springtime surface temperature over Siberia and early summer blocking activity over the northwest Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, submitted.
- Cha, E.-J., E.-J. Lee, and J.-G. Jhun, 2004: The characteristics and causes of extreme rainfall events in August over Korea. *International J. Climatol.*, submitted.
- Inatsu, M., and M. Kimoto, 2004: Two types of interannual variability of the mid-winter storm-track and their relationship to global warming. *Geophys. Res. Lett.*, submitted.

【査読付き論文(投稿準備中)】

- Cha, E.-J., and M. Kimoto, 2004: Sommertime ENSO teleconnection over the Eurasia. in preparation.
- Cha, E.-J., and M. Kimoto, 2004: East Eurasian snow cover triggering the Northern Annular Mode? to be submitted to *J. Meteor. Soc. Japan*.
- Kimoto, M., and X.-S. Shen, 2004: Coupled variability of the Eurasian land surface and the atmospheric circulations during cold seasons. Part I: Trend and interannual variability of Eurasian surface air temperature. in preparation for *J. Meteor. Soc. Japan*.
- Shen, X.-S., and M. Kimoto, 2004: Coupled variability of the Eurasian land surface and the atmospheric circulations during cold seasons. Part II: Mechanisms for surface temperature anomalies. in preparation for *J. Meteor. Soc. Japan*.
- Yasutomi, N., and M. Kimoto, 2004: Detection of principal modes of Asian summer monsoon variability. in preparation.
- Yasutomi, N., and M. Kimoto, 2004: The dynamics of the Pacific-Indo dipole mode. in preparation.

【査読なし論文・報文・著書等】

- 木本昌秀, 2004: コンピュータで地球の将来がわかるの

か？—気候モデルとそれを用いた研究について—、河川文化：河川文化を語る会講演集（その16）、（社）日本河川協会、51-118。

木本昌秀，渡部雅浩，2004：北極振動の中立モード理論。気象研究ノート第206号（「北極振動」山崎孝治編），11-22。

渡部雅浩，木本昌秀，2004：NAOの力学と長周期変動。気象研究ノート第206号（「北極振動」山崎孝治編），23-48。

安富奈津子，木本昌秀，2004：夏季アジアモンスーン域の主要変動モード。グロースペクター，42，19-31。

高嶽 緑，2003：モンスーンの季節内振動。気象研究ノート第204号「モンスーン研究の最前線」 p41-67。

前田修平，伊藤明，松下泰広，2003：気象庁における力学的季节予報実験。グロースペクター第41巻，1-14。

木本昌秀，2003：中緯度および熱帯における再帰的な変動モードとその予測可能性。グロースペクター，41，89-94。

石井正好，坂元賢治，木本昌秀，2003：気候の監視と予測のための全球海洋データ同化。グロースペクター，41，15-21。

【学会発表】（略；134件）

【取材、一般向け講演等】

木本昌秀，2004：異常気象と地球温暖化について。TOKYO-FM サタデーウェイティングパー2004年10月2日放送。

木本昌秀，2004：'04年異常気象の連鎖 地球崩壊。週刊現代2004年10月2日号。（取材）

木本昌秀，2004：検証 2004年の猛暑。農業協同組合新聞。（取材）

木本昌秀，2004：今年の異常気象と地球温暖化。TBS プロードキャスター2004年9月11日放送。

木本昌秀，2004：異常気象のコワ〜い連鎖—猛暑、豪雨、台風、噴火、次は「大地震」？サンデー毎日2004年9月19日号。（取材）

木本昌秀，2004：台風上陸最多タイ。産経新聞2004年8月31日朝刊。（取材）

木本昌秀，2004：地球温暖化進めば梅雨の雨量 10%増—2070年、東大が試算。日本経済新聞2004年8月23日朝刊。（取材）

木本昌秀，2004：猛暑と豪雨：温暖化進めばより深刻に。読売新聞2004年8月13日朝刊「論点」。（寄稿）

木本昌秀，2004：特集「世界中で異常気象 いま地球に何が」NHK-BS ニュース・きょうの世界，2004年8月11日放送。

木本昌秀，2004：太平洋高気圧に異変。東京新聞2004年7月30日朝刊。（取材）

木本昌秀，2004：「少雪」の読み方。読売新聞2004年2月1日朝刊。（取材）

木本昌秀，2004：「異常」気象の科学。電力館科学ゼミナール，2004年1月24日。

木本昌秀，2003：高校講座理科総合 AB「大気や水が循環しない？」NHK 教育TV 2003年12月10日放送。（出演）

木本昌秀，2003：今夏の『異常気象』は温暖化の予兆か？第12回伊藤忠シンポジウム，2003年12月9日伊藤忠商事株式会社 東京本社ビル。

木本昌秀，2003：異常気象レポート2003：冷夏の日本、熱波の欧州、世界を襲う気象異変。Newton2003年12月号、

96-103。

木本昌秀，2003：インタビュー「昨今の世界的異常気象は地球温暖化の影響ですか？」岩波書店「世界」2003年11月号。

木本昌秀，2003：この夏、世界の「異常気象」原因はダブルジェット。少年少女新聞2003年10月5日。（取材）

木本昌秀，2003：今年の夏はどこか変！？気象のメカニズムを探る。東京大学新聞2003年9月23日。（取材）

木本昌秀，2003：ニュースステーション「ジェット気流の蛇行と異常気象」テレビ朝日2003年8月12日放送。（取材）

木本昌秀，2003：素敵な宇宙船地球号「温暖化と向き合うII」テレビ朝日2003年8月3日放送。（取材）

木本昌秀，2003：世界各地で異常気象。日本経済新聞2003年7月13日。（取材）

木本昌秀，2003：梅雨これがしくみ！！少年少女新聞2003年6月29日。（取材）

木本昌秀，2003：桜 4月危機 3月の気温上昇早まる開花。東京新聞2003年3月18日。（取材）

木本昌秀，2002：素敵な宇宙船地球号「シリーズ温暖化と向き合う～vol.1 温暖化 その未来地図。テレビ朝日，2002年8月11日放送。

木本昌秀，2002：リアルタイム，毎日放送，2002年8月9日。（取材）

木本昌秀，2002：ラジオ朝一番ニュースアップ（7月に2つの台風日本を襲う）NHK ラジオ第一2002年7月24日放送。（取材）

木本昌秀，2002：大規模エルニーニョの兆候9年ぶりコメ大凶作か？アエラ2002.4.8No.15 pp.12-13。（取材）

木本昌秀，2002：エルニーニョ今夏発生のきざし 商品市況かく乱も。日本経済新聞2002年4月2日夕刊。（取材）

木本昌秀，2002：桜の早期開花と暖冬・北極振動について。フジTV，EZ-TV，2002年3月31日放送。